

ОСОБЛИВОСТІ ВИВЧЕННЯ У СЕРЕДНІЙ ШКОЛІ ПИТАНЬ ПРО ПРИСКОРЮВАЧІ ЕЛЕМЕНТАРНИХ ЧАСТИНОК

Микола Шут, Микола Садовий

У статті висвітлені особливості вивчення в середній школі питань про прискорювачі елементарних частинок, зокрема, Великий адронний колайдер.

In the article the features of study at secondary school of questions are lighted up about accelerating of elementary particles, in particular, Large Hadron Collider.

У науково-популярній літературі та засобах масової інформації (ЗМІ) протягом 2008 р. висвітлювалась інформація про найбільший у світі міжнародний науковий проект, який називають Великий адронний колайдер – прискорювач заряджених частинок на зустрічних пучках, що споруджено для вивчення продуктів їх співударів (призначений для прискорення протонів і важких іонів свинцю). За допомогою прискорювачів ученим вдається надати елементарним частинкам речовини високу кінетичну енергію, а після їх зіткнень – спостерігати утворення інших частинок. Ця проблема у методичній літературі майже не розкрита, проте учні виявляють значну зацікавленість до неї. На нашу думку вивчення теми прискорювачі елементарних частинок [2] необхідно доповнити інформацією про найновіший колайдер у світі.

Повідомляємо учням, що колайдери поділяються на кільцеві та лінійні.

До кільцевих відноситься і Великий адронний колайдер (англ. *Large Hadron Collider, LHC*), що побудований у науково-дослідницькому центрі Європейської ради ядерних досліджень (фр. *Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire, CERN*) на кордоні Швейцарії та Франції, неподалік від Женеви. Проект Великого адронного колайдера (ВАК) виник у 1984 році. Офіційно він отримав схвалення на десять років пізніше. Його будівництво розпочалось у 2001 р. після закінчення робіт Великого електрон-позитронного колайдера. На 2009 рік ВАК є найбільшою експериментальною установкою у світі.

Великим прискорювач назвали через його розміри: довжина основного кільця прискорювача складає 26 659 м; адронним – через прискорення адронів, частинок, що складаються із кварків; колайдером (англ. *collide* – зіткнення) – бо пучки частинок прискорюються у протилежних напрямках і стикаються у спеціальних місцях [3].

У підручниках для середньої школи подані приклади характеристик окремих прискорювачів, проте відсутня інформація про прискорювачі на зустрічних пучках, хоч вони вже використовуються декілька десятиліть. На новому прискорювачі передбачається здійснити зіткнення протонів з сумарною енергією 14 TeV (1 тераелектронВольт = $1 \cdot 10^{12}$ електронВольт) у системі центру мас частинок, які стикаються, а також ядра свинцю з енергією 5,5 GeV ($5,5 \cdot 10^9$ електронВольт) на кожен пару нуклонів, які стикаються. ВАК є найбільш високоенергетичним прискорювачем елементарних частинок у світі. Він за енергією на порядок перевищує своїх найближчих конкурентів: протон-антипротонний колайдер Теватрон, що працює у Національній прискорювальній лабораторії ім. Е.Фермі (США), і релятивістський колайдер важких іонів RHIC Брукхейвенської лабораторії (США) (таблиця 1).

Прискорювач знаходиться у тому ж тунелі, де був розміщений Великий електрон-позитронний колайдер. Тунель має довжину кола 26,7 км і розміщений на глибині біля ста метрів під землею на території Франції і Швейцарії. Протонні пучки утримуються 1 624 надпровідними магнітами. Їх загальна довжина перевищує 22 км. Останній із них був установлений у тунелі 27 листопада 2006 р. Магніти будуть працювати при

температурі 1,9 К (–271°C). Будівництво спеціальної криогенної лінії для охолодження магнітів закінчено 19 листопада 2006 р. [1; 4].

У методичній літературі з фізики для загальноосвітньої середньої школи передбачається вивчення чотирьох фундаментальних взаємодій, але немає інформації про перспективи розвитку єдиної теорії взаємодій. Тому варто у загальних обрисах познайомити учнів з такими перспективами.

Таблиця 1

Перелік основних прискорювачів

Прискорювач	Центр, місто, країна	Роки дії	Частинки, що прискорюються	Максимальна енергія пучка, GeV	Світимість, $10^{30} \text{ см}^{-2} \text{ сек}^{-1}$	Периметр (довжина), км
ВЭПП-2000	ІЯФ, Новосибірськ, Росія	з 2006	e^+e^-	1,0	100	0,024
ВЭПП-4М	ІЯФ, Новосибірськ, Росія	з 1994	e^+e^-	6	20	0,366
БЕРС	Китай	1989–2005	e^+e^-	2,2	5 на 1,55 GeV; 12,6 на 1,843 GeV	0,2404
БЕРС-II	Китай	з 2007	e^+e^-	1,89	1000	0,23753
DAΦNE	Frascati, Італія	1999–2008	e^+e^-	0,7	150	0,098
CESR	Cornell	1979–2002	e^+e^-	6	1280 на 5,3 GeV	0,768
CESR-C	Cornell	з 2002	e^+e^-	6	60 на 1,9 GeV	0,768
КЕКВ	КЕК, Японія	з 1999	e^+e^-	$e^- \times e^+ 8 \times 3,5$	16270	3,016
PEP-II	SLAC, Стенфорд, США	з 1999	e^+e^-	e^- : 7–12 GeV; e^+ : 2,5–4 GeV	10025	2,2
SLC	SLAC, Стенфорд, США	1989–1999	e^+e^-			
HERA	DESY, Німеччина	з 1992	$e p$	e 30; p 920	75	6,336
TEVATRON	Fermilab, США	з 1987	$p\bar{p}$	980	171	6,28
RHIC	Brookhaven, США	з 2000	pp , Au-Au, Cu-Cu, d-Au	100	10, 0,0015, 0,02, 0,07	3,834
LEP	CERN	1989–2000	e^+e^-	100–104,6	24 на Z^0 ; 100 при >90 GeV	26,659
LHC	CERN	з 2008	pp , Pb-Pb			

Ми пропонуємо познайомити учителів фізики, а відповідно і учнів з тенденціями розвитку глобальних фізичних теорій. Нині домінують дві. Обидві у фізиці виникли у першій чверті XX ст.: загальна теорія відносності (ЗТВ) Альберта Ейнштейна, яка описує Всесвіт на макрорівні, і квантова теорія поля, яка описує Всесвіт на мікрорівні.

У діючих підручниках з фізики ці проблеми поза уваги, а наукові досягнення фізики викладено на рівні 50-60-х років минулого століття. З метою усунення цього недоліку варто розкрити старшокласникам, зокрема, проблему, що для наступного об'єднання фундаментальних взаємодій в одну теорію використовуються різні підходи. До них можна віднести теорію струн, яка одержала свій розвиток у М-теорії (теорії бран), теорія супергравітації, петлеву квантову гравітацію та ін. Кожна з них має внутрішні проблеми і жодна з них не має експериментального підтвердження. Проблема у тому, що для проведення відповідних експериментів потрібні енергії, які є недосяжними на сучасних прискорювачах заряджених частинок. На великому адронному коллайдері (БАК) можна провести експерименти, які ймовірно підтвердять чи спростують частину цих теорій. Так, існує цілий спектр фізичних теорій з розмірностями більше чотирьох, які передбачають існування «суперсиметрії», наприклад, теорія струн (яку інколи називають теорією суперструн) якраз через те, що без суперсиметрії вона втрачає фізичний зміст. У випадку підтвердження існування суперсиметрії буде мати місце непряме підтвердження істинності цих теорій [6, с. 732].

Корисно показати учням систему пристроїв прискорювача. На БАК передбачено функціонування шести детекторів, рис. 1: *ALICE* (*A Large Ion Collider Experiment*), *ATLAS* (*A Toroidal LHC ApparatuS*), *CMS* (*Compact Muon Solenoid*), *LHCb* (*The Large Hadron Collider beauty experiment*), *TOTEM* (*TOTAL Elastic and diffractive cross section Measurement*) та *LHCf* (*The Large Hadron Collider forward*). Детектори *ATLAS* та *CMS* призначені для пошуку бозонів Хіггса і «нестандартної фізики», зокрема темної матерії. *ALICE* – для вивчення кварк-глюонної плазми у зіткненнях важких іонів свинцю, *LHCb* – для дослідження фізики *b*-кварків, що дозволить краще зрозуміти різницю між матерією і антиматерією, *TOTEM* – для вивчення частинок, що не стикаються (*forward particles*). Таке дозволить точніше виміряти розмір протонів, а також контролювати світність коллайдера. *LHCf* – призначений для дослідження космічних променів, що моделюються за допомогою тих же частинок, які не стикаються [7].

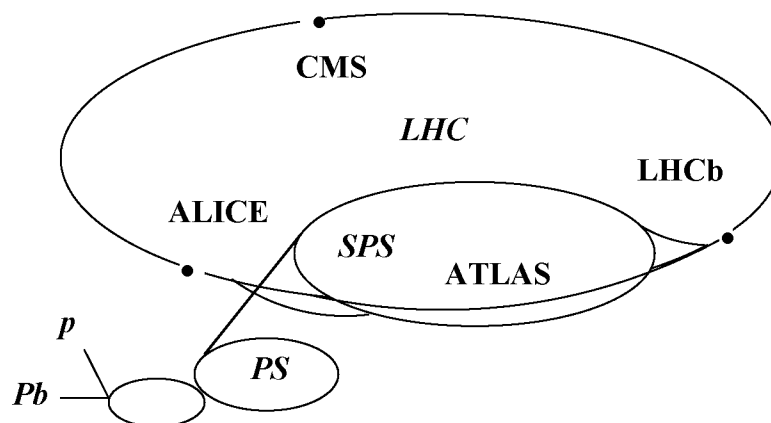


Рис. 1. Схема функціонування детекторів

Траєкторія протонів *p* (і важких іонів свинцю *Pb*) бере початок у лінійних прискорювачах у точках *p* і *Pb*, відповідно, рис. 1. Потім частинки попадають у бустер протонного синхротрона (*PS*). Через нього попадають у протонний суперсинхротрон (*SPS*) і, нарешті, безпосередньо в тунель БАК.

Детектори *TOTEM* і *LHCf*, відсутні на схемі, але знаходяться поряд з детекторами *CMS* і *ATLAS*, відповідно.

Крім того слід зазначити, що у підручниках з фізики не приводяться реальні приклади досліджень з використанням швидкостей, майже рівних швидкості світла. Якраз швидкість частинок у БАК на зустрічних пучках близька до швидкості світла у

вакуумі. Частинки до великих швидкостей прискорюються у декілька етапів. Спочатку низькоенергетичні лінійні прискорювачі Linac 2 і Linac 3 проводять інжекцію протонів та іонів свинцю на низьких енергіях. Потім частинки попадають у PS-бустер і звідти у сам PS (протонний синхротрон). Енергія частинок досягає декількох гігаелектронновольт. Наступне прискорення продовжується у SPS-бустері й у SPS (протонний суперсинхротрон). Енергія частинок у SPS досягає сотень гігаелектронновольт. Згодом пучок спрямовується до головного 26,7-кілометрового кільця, де у точках зіткнення детектори фіксують усі події. Нові властивості дослідження частинок, перевірка гіпотез, теорій тощо.

Важливим є показати учням, що перша частина попередніх випробувань успішно проведена 11 серпня 2008 р. Пучок заряджених частинок пройшов шлях більше трьох кілометрів в одному із кілець ВАКА. Ученим удалось перевірити роботу синхронізації попереднього прискорювача, так званого протонного суперсинхротрона (SPS), і системи правої доставки пучка. Ця система передає в основне кільце пучки, які прискорені таким чином, щоб вони рухались у кільці за годинниковою стрілкою. В результаті випробовування вдалось оптимізувати роботу системи.

Другий етап досліджень відбувся 24 серпня 2008 року. Була протестована інжекція протонів у прискорюючому кільці ВАК у напрямку проти годинникової стрілки [3].

Офіційний же запуск коллайдера здійснено 10 вересня 2008 року. Запущений пучок протонів успішно пройшов весь периметр коллайдера за ходом годинникової стрілки. Майже через 5 годин було запущено пучок протонів проти годинникової стрілки, який також успішно пройшов весь периметр коллайдера.

12 вересня 2008 року на прискорювачі вдалось запустити і неперервно утримувати циркулюючий пучок протягом 10 хвилин. Дещо пізніше пучок був запущений знову і циркулював уже неперервно. Процес переривався лише за необхідності. На цьому завдання з установки циркулюючого пучка завершилась, і фізики приступили до тестування магнітної системи [4].

Наступний етап передбачає одночасний запуск пучків назустріч один одному, щоб спостерігати, що здійснюється за «лобових» зіткнень. Потім частинки будуть стикатись на більш високих енергіях. Вихід на енергію 14 TeV протон-протонного зіткнення планується на 2009 рік.

Ми пропонуємо ознайомити учнів з основними проблемами, які будуть вирішуватись за допомогою ВАК, починаючи з 2009 року. До таких проблем можна віднести у рамках Стандартної Моделі: вивчення топ-кварків, дослідження механізму електрослабкої симетрії, вивчення кварк-глюонної плазми, пошук суперсиметрії, вивчення фотон-адронних і фотон-фотонних зіткнень, перевірка екзотичних теорій та ін.

Топ-кварк – це найважчий кварк і найважча з відкритих елементарних частинок. Дослідження на Теватроні дають підстави стверджувати, що його маса складає $(171,4 \pm 2,1)$ GeV. Через велику масу топ-кварк до цього часу спостерігався лише на одному прискорювачі – Теватроні. На інших прискорювачах просто не вистачає енергії для його народження. Крім цього, топ-кварки цікавлять фізиків не тільки як частинки, але і як «робочий інструмент» для вивчення хіггсовського бозона. Передбачається здійснити народження хіггсовського бозона у ВАК як асоціативне народження разом з топ-кварк-антикварковою парою. Щоб надійно відділити такі події від фону, потрібно спочатку добре вивчити властивості самих топ-кварків.

Однією з основних цілей проекту створення ВАК є експериментальне підтвердження існування бозона Хіггса. Цю частинку передбачив шотландський фізик

Пітер Хіггс у 1964 р. у рамках Стандартної Моделі. Фізиків цікавить не стільки сам хіггсовський бозон, скільки хіггсовський механізм порушення електрослабкої симетрії. Якраз вивчення цього механізму, можливо наштовхне фізиків на нову теорію будови світу, більш ґрунтовну, ніж СМ. Інформацію про бозон Хіггса планується одержати лише у 2010 році. Так вважає заступник директора Інституту фізики високих енергій, координатор російської участі у експерименті ATLAS на БАК Олександр Зайцев [3].

Одночасно передбачається, що у прискорювачі будуть досліджені ядерні протон-протонні зіткнення і зіткнення ядер свинцю. Коли стикаються два ядра на ультрарелятивістських швидкостях за короткий проміжок часу виникає, а потім розпадається густий і досить гарячий шматок ядерної речовини. Розуміння цих явищ (перехід речовини у стан кварк-глюонної плазми та її охолодження) дає можливість побудувати більш досконалу теорію сильних взаємодій, яка виявиться корисною як для ядерної фізики, так і для астрофізики.

Важливою мотиваційною інформацією для учнів є і те, що вчені покладають надію на БАК: довести чи спростувати «суперсиметрію» – теорію, яка стверджує, що будь-яка субатомна частинка має набагато важчого партнера, або «суперчастинку».

Формування у БАК фотон-адронних та фотон-фотонних зіткнень на зустрічних потоках дасть можливість розширити знання про ці частинки та їх властивості. Протони електрично заряджені. Ультрарелятивістський протон породжує хмару майже реальних фотонів, що летять поряд з протоном. Через великий електричний заряд ядра цей потік фотонів стає ще сильнішим у режимі ядерних зіткнень. Такі фотони можуть стикатись як із зустрічними протонами, народжуючи типові фотон-адронні зіткнення, так і зіткнення фотон-фотонні [4].

У кінці ХХ століття теоретики-фізики висунули велику кількість незвичних для сприйняття ідей щодо будови Всесвіту. Моделі, побудовані на таких ідеях, називали «екзотичними моделями». До них відносяться теорії з сильною гравітацією на масштабі енергій порядку 1 TeV; моделі з великою кількістю просторових вимірів; преонні моделі, у яких кварки і лептони є складовими частинками; моделі з новими типами взаємодій. Накопичені експериментальні дані ще недостатні для створення однієї єдиної теорії будови речовини. Експериментатори планують на БАК перевірити передбачення і знайти певні сліди тих чи інших теорій у результатах досліджень на прискорювачі.

Ознайомлення школярів з планами науковців сприяє розвитку інтересу до фізики. Зокрема, науковці планують виявити фізичні явища поза рамок Стандартної Моделі. Планується дослідити властивості W і Z -бозонів, ядерних взаємодій на надвисоких енергіях, процесів народження і розпадів важких кварків (b і t). БАК слугує поки що, перспективою для одержання інформації про бозон Хіггса. У рамках існуючих уявлень ця частинка відповідає за масу елементарних частинок. Для виявлення слідів цієї частинки побудовано два найбільших детекторів БАК – CMS і ATLAS.

Таким чином, поступове запровадження у зміст ШКФ результатів наукових досягнень сприяє зацікавлення учнів до знань, формує в них наукову фізичну картину світу.

БІБЛІОГРАФІЯ

1. Dimopoulos, S. and Landsberg, G. Black Holes at the Large Hadron Collider. Phys. Rev. Lett. 87 (2001).
2. Гончаренко С.У. Фізика: проб. навч. пос. для 11 кл. середн. загальноосвітніх шк. – К.: Освіта, 1997. – 448 с.
3. Столкновение на встречных курсах // Вокруг света. – № 71 (2802) – июль 2007.
4. Большой адронный коллайдер: что это такое? Радиостанция «Эхо Москвы» (8 июля 2008). – Беседа с кандидатом физико-математических наук, главным редактором журнала «Наука и жизнь» Еленой Лозовской.

5. Наталия Лескова. Червоточина во времени. Газета «Русский курьер» № 631 (18 февраля 2008).
6. Физический энциклопедический словарь /Гл. ред. А.М.Прохоров. Ред. кол. Д.М.Алексеев, А.М.Бонч-Бруевич, А.С.Боровик-Романов и др. – М.: Сов. энциклопедия, 1983. – 928 с.
7. На LHC запущен стабильно циркулирующий пучок // Элементы большой науки – № 9 (12 сентября 2008).
8. <http://pdg.lbl.gov>

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Шут Микола Іванович – завідувач кафедри загальної та прикладної фізики Національного педагогічного університету імені М.П. Драгоманова, доктор фізико-математичних наук, професор, член-кореспондент АПН України.

Наукові інтереси: проблеми методики викладання фізики у вищій школі.

Садовий Микола Ілліч – доктор педагогічних наук, професор кафедри фізики та методики її викладання Кіровоградського державного педагогічного університету імені Володимира Винниченка.

Наукові інтереси: проблеми дидактики фізики.